

УДК 621.396.96

ОПЕРАТИВНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ИНДЕКСА ПРЕЛОМЛЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТРОПОСФЕРНЫХ ВОЛНОВОДОВ

В.Л. Мисайлов¹, Ю.Н. Ульянов²¹Харьковский университет Воздушных Сил,²Национальный технический университет "ХПИ")

Проведен анализ метеорологических условий, способствующих возникновению тропосферных волноводов (ТВВ). Обоснованы требования к методу измерения индекса преломления тропосферы для оперативной диагностики ТВВ. Проведена сравнительная оценка существующих методов и средств измерения параметров тропосферы. Показано, что для оперативного измерения индекса преломления тропосферы предпочтителен метод радиоакустического зондирования. Обоснованы возможные варианты дальнейшего развития этого метода.

тропосферные волноводы, индекс преломления тропосферы, метод радиоакустического зондирования

Постановка проблемы. Как известно, дальность действия и качество функционирования радиолокационных станций и беспроводных средств связи во многом определяется условиями распространения радиоволн (РРВ) [12, 15, 40, 45]. В литературе описаны случаи, когда РЛС обнаруживали самолеты, летящие далеко за пределами радиогоризонта и не обнаруживали объекты, которые были видны оптически [36].

Увеличение количества связных, вещательных и радиолокационных станций, расширение спектра используемых сигналов ставит задачу обеспечения электромагнитной совместимости радиосредств различного назначения на ограниченной территории. Решение этой задачи требует оперативной оценки текущих условий РРВ вдоль радиотрассы, особенно таких, которые приводят к значительному увеличению дальности действия радиосредств по сравнению с расчетной [18].

Анализ литературы. На работу радиосредств УКВ диапазона, расположенных вблизи земной поверхности, существенное влияние оказывают радиофизические характеристики тропосферы [2, 23].

Тропосфера является сплошной случайной средой [17]. Ее радиофизические свойства описывают диэлектрической проницаемостью $\varepsilon(\vec{r}, t)$ или коэффициентом преломления $n(\vec{r}, t) = \sqrt{\varepsilon(\vec{r}, t)}$, которые зависят от времени t и пространственных координат \vec{r} . В силу малого отличия n от единицы, на практике удобнее пользоваться индексом преломления N :

$$N = (n - 1) \cdot 10^6, \quad (1)$$

который измеряется в специальных N-единицах [36].

Значение индекса преломления связано с метеорологическими характеристиками тропосферы полуэмпирической формулой Дебая [7]^

$$N = \frac{77,6}{T_B} \left(p_B + \frac{4810 e_B}{T_B} \right), \quad (2)$$

где T_B – температура воздуха, К; p_B – атмосферное давление, мб; e_B – давление водяного пара, мб.

Радиофизическую модель тропосферы, т.е. пространственно-временное распределение индекса преломления, можно представить в виде совокупности трех компонент [23]:

- 1) регулярной составляющей индекса преломления, которая определяется профилями средних значений температуры, влажности и давления воздуха;
- 2) мелкомасштабной компоненты, свойства которой могут быть описаны в рамках локально-однородной и локально-изотропной модели турбулентности;
- 3) крупномасштабных неоднородностей, в том числе в виде протяженных в горизонтальном направлении слоев.

В виду сложности процессов, происходящих в тропосфере, до сих пор не создана единая модель, которая адекватно отображала бы пространственное распределение индекса преломления над всей поверхностью Земли [2]. Стандарты, которыми пользуются при оценке условий работы радиосредств на этапе проектирования, являются усредненными радиоклиматологическими моделями, основанными на данных, собранных за очень большой период времени [7, 23]. Эти модели описывают регулярную составляющую индекса преломления и частично учитывают его мелкомасштабную компоненту. Радиофизические модели тропосферы, которые учитывают крупномасштабные (в том числе слоистые) неоднородности индекса преломления, отсутствуют. Это связано со сложностью математического описания распространения радиоволн при наличии неоднородностей индекса преломления различного масштаба и низкой повторяемостью подобных условий. Использование моделей, недостаточно полно отражающих реальные условия РРВ, приводит к ошибкам в энергетических расчетах радиотрасс. Погрешность инженерных расчетов множителя ослабления в диапазоне частот 0,1 – 10 ГГц составляет 10 – 18 дБ [16]. При наличии крупномасштабных (особенно слоистых) неоднородностей индекса преломления величина таких погрешностей может значительно возрастать.

Согласно экспериментальным данным, аномальные значения множителя ослабления, а также значительное увеличение дальности радиосвязи и обнаружения целей РЛС обусловлено сверхрефракционными условиями распространения радиоволн и образованием тропосферных волноводов (ТБВ) [1, 7, 14, 23, 27, 28, 35, 36]. Для оценки волноводных свойств тропосферы используют модифицированный индекс преломления [7, 28, 36]

$$M(h) = N(h) + h/a_{зем} \cdot 10^6,$$

где h – высота над уровнем моря, $a_{зем} = 6370$ км – радиус Земли.

Пример $M(h)$ -профилей приведен на рис. 1. Прямая 1 соответствует нормальной рефракции. На кривых 2 и 3 на участках, показанных стрелками, значения $M(h)$ с высотой уменьшается, что указывает на возможность возникновения тропосферных волноводов.

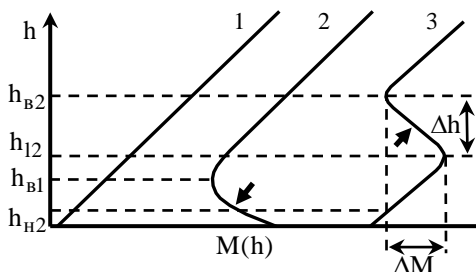


Рис. 1. Пример высотных M -профилей

Тропосферный волновод, как правило, характеризуют такими параметрами, как верхняя и нижняя граница, толщина (мощность) и величина M -инверсии (M -дефицит).

В соответствии с [28] верхней границей считается высота h_B , на которой $dM/dh = 0$, нижней границей – высота h_n , на которой $M(h_n) = M(h_B)$. Если $h_n = 0$ или такой h_n не существует (кривая 2 на рис.1), то речь идет о приводном (приземном) волновом. Если $h_n > 0$, то волновод называют приподнятым (кривая 3 на рис.1). Толщиной M -инверсии Δh называют величину слоя, в котором $dM/dh < 0$.

Величина M -инверсии определяется по формуле

$$\Delta M = M(h_1) - M(h_B), \text{ где } h_1 = h_B - \Delta h.$$

Для черноморского бассейна обычно [28]:

$$h_1 = 200 - 1500 \text{ м}; \quad \Delta h = 100 - 300 \text{ м}; \quad \Delta M \approx 10 \div 30 \text{ N-единиц}.$$

Для оперативного прогноза условий распространения радиоволн необходимы данные о пространственной структуре индекса преломления тропосферы, полученные в режиме реального времени [2].

Цель статьи. Целью работы является выбор оперативного метода измерения индекса преломления тропосферы для диагностики и прогнозирования волноводных условий распространения радиоволн.

Метеорологические условия, способствующие возникновению тропосферных волноводов. Радиофизические свойства тропосферы зависят от конкретной метеорологической ситуации. Поэтому сначала рассмотрим метеорологические условия, способствующие возникновению тропосферных волноводов. Это позволит нам обосновать требования, которым должен отвечать метод измерения индекса преломления.

Образование ТВВ возможно [1, 14, 23, 28, 27]:

- а) при ветре от нагретой поверхности суши на более холодное море или когда теплый поток воздуха движется над холодным течением;
- б) при оседании воздуха и дивергенции в нижних слоях;
- в) при фёновых явлениях, если при этом поток воздуха течет над морем или над поверхностью увлажненной земли;
- д) при морском бризе, когда наблюдается быстрое падение влажности воздуха с высотой.

Погодные условия, при которых происходит перемешивание слоев воздуха, не благоприятствуют образованию аномальной рефракции.

Требования к методу оперативного измерения индекса преломления тропосферы. Согласно данным радиометеорологических исследований, над акваторией Черного моря тропосферные волноводы практически не встречаются на высотах более 2000 м [28]. Поэтому зондирование тропосферы желательно производить до этой высоты. Начинать измерения необходимо от поверхности земли. Для условий суши это не вызывает затруднения, но измерения у поверхности моря при наличии волнения практически невозможны. Для описания условий распространения радиоволн в слое тропосферы непосредственно прилегающем к поверхности моря существуют модели, которые с достаточной точностью аппроксимируют реальные вертикальные $N(h)$ -профили в приводном слое [2, 28]. Исходными данными для таких моделей является разность температур воздуха и морской воды, скорость ветра у морской поверхности, значение влажности воздуха на известной высоте [39]. Такие данные можно получить, используя стандартную аппаратуру для наземных метеонаблюдений. Среднее значение высоты верхней границы волновода испарения составляет порядка 12 м [28], поэтому нижняя граница зондирования может составлять порядка 10 – 15 метров.

Найдем, каким пространственным разрешением по вертикали Δz и горизонтали Δx должен обладать метод измерения индекса преломления тропосферы для диагностики ТВВ в интересах, например, радиолокации под малыми углами места.

Возникновение ТВВ связано с наличием инверсионных участков на $M(h)$ -профиле. Максимальную длину захватываемой радиоволны λ_{\max} и

толщину М-инверсии Δh при линейно-ломаной аппроксимации $M(h)$ -профиля связывает выражение [36, 45]

$$\lambda_{\max} = \frac{16\sqrt{2}}{9} \sqrt{|dM/dh|} \cdot 10^{-3} \cdot \Delta h^{3/2}, \quad (3)$$

откуда

$$\Delta h = 37,53 \sqrt{\frac{3\lambda_{\max}^2}{|dM/dh|}}. \quad (4)$$

Зная рабочую частоту или длину волны РЛС можно определять наличие тропосферных волноводов, вертикальные размеры которых достаточны для захвата радиоволн, излучаемых данной РЛС.

Для акватории черного моря $dM/dh \geq -0,3$ [28]. Максимальный интервал между вертикальными отсчетами Δz для восстановления $N(h)$ -профиля должен быть $0,5\Delta h$ [4], откуда

$$\Delta z = 40,4 \cdot \lambda_{\max}^{2/3}. \quad (5)$$

Для оценки разрешающей способности по горизонтали Δx , найдем размеры области, существенной для распространения радиоволн [45].

Обнаружение цели в ТВВ возможно радиолокационной станцией, антенна которой также находится внутри волновода. Высота подъема антенны z ($z \leq H_{\text{ТВВ}}$) и высота положения цели относительно нижней (или верхней) стенки ТВВ примерно одинаковы. Максимальный размер первой зоны Френеля $2a_1$ будет

$$2a_1 = \frac{2}{\sin \Theta_{\text{кр}}} \sqrt{\frac{\lambda_{\max} \cdot H_{\text{ТВВ}}}{2 \sin \Theta_{\text{кр}}}}, \quad (6)$$

где $\Theta_{\text{кр}}$ – максимальный (критический) угол захвата радиоволн в ТВВ.

Полагаем рефракцию ниже М-инверсии нормальной, тогда, с учетом (4), получаем

$$H_{\text{ТВВ}} = 37,5 \cdot 3 \sqrt{\frac{3\lambda_{\max}^2}{|dM/dh|} \left(1 + \frac{|dM/dh|}{0,118} \right)}. \quad (7)$$

По теореме отсчетов [4] и с учетом (5) и (7) будет

$$\Delta x = 8,46 (\sin \Theta_{\text{кр}})^{-3/2} \lambda_{\max}^{5/6} \quad (8)$$

Так как $\Theta_{\text{кр}} \leq 0,5^\circ$, то $\Delta x \approx 10378 \cdot \lambda_{\max}^{5/6}. \quad (9)$

В табл. 1 приведены расчетные значения вертикальных размеров волновода и необходимая пространственная дискретность измерений для радиоволн различных диапазонов, полученных с использованием соотношений (3) – (9).

Таблица 1

Максимальная пространственная дискретность измерений параметров ТВВ

Длина волны, захватываемая ТВВ, м	0,03	0,1	0,3	1
Минимальные вертикальные размеры ТВВ, м	27,6	61,7	128	286
Δz , м	3,9	8,7	18,1	40,4
Δx , м	559	1523	3805	10378

При оценке влияния условий РРВ на работу радиосредств, допустимой можно считать ошибку расчета множителя ослабления порядка 20%. Тогда точность измерения параметров тропосферы должна быть такой, чтобы среднеквадратическая ошибка (СКО) индекса преломления σ_N была не более 1 N-единицы [19].

Под оперативным прогнозом условий распространения радиоволн будем понимать период прогнозирования порядка 1 – 2 часов. Столь короткий промежуток времени определяется быстрой изменчивостью метеорологической обстановки, а, следовательно, и условий распространения радиоволн в прибрежной зоне и над акваторией внутренних морей, таких как Черное и Азовское море [2, 28]. Всякий прогноз имеет практическую ценность, если его выполнение занимает гораздо меньше времени, чем длится прогнозируемый период. В этой связи можно допустить, что выполнения всех необходимых измерений и расчетов должно составлять не более 10 минут. Для уменьшения влияния турбулентного перемешивания тропосферы на получаемые значения метеовеличин, результаты измерений необходимо усреднять за время 0,2 – 5 минут [9, 20, 37].

Оперативный прогноз условий РРВ требует, для получения исходных данных, использования метода, который позволяет производить измерения индекса рефракции в диапазоне высот от 12 м до 2 км, с дискретностью по высоте 3.9 метров, $\sigma_N \leq 1$ N-единицы за время не более 10 минут при слабом ветре (до 5 м/с) в приземном слое. Следует подчеркнуть требование низкой стоимости измерений и мобильности аппаратуры.

Методы определения пространственной структуры индекса преломления тропосферы. Пространственное распределение коэффициента преломления тропосферы находят различными методами [7, 10, 11, 20, 21, 24, 28, 29, 47]. Все эти методы можно разделить на контактные и неконтактные, которые, в свою очередь, делятся на прямые и косвенные. Промежуточное положение занимают комбинированные методы, сочетающие измерительные устройства контактного типа и средства дистанционного съема информации.

Контактные методы позволяют проводить измерения в той точке пространства, в которой находится измерительный прибор. Дистанционные –

дают возможность производить измерения на расстоянии. Прямые методы основаны на непосредственном измерении интересующей физической величины. При использовании косвенных методов сначала находят температуру, давление и влажность воздуха, а затем вычисляют значение индекса преломления по формуле (2). Кроме названных выше методов измерения, также существуют методы восстановления пространственной структуры индекса преломления тропосферы по результатам измерения астрономической рефракции вблизи горизонта, радиометрическим измерениям или на основании решения уравнения турбулентной диффузии [2, 10, 11, 29].

Точностные характеристики основных методов определения пространственной структуры индекса преломления тропосферы, для удобства сравнения, сведены в таблицу (табл. 2). Величина σ_N для косвенных методов вычислена с учетом поправок, приведенных в [8] для высот 0, 1 и 3 км.

Из табл. 2 видно, что ни один из существующих методов определения $N(h)$ не удовлетворяет всем изложенным требованиям. Возможным путем решения этой проблемы может быть совместное использование различных методов измерения с целью их взаимного дополнения, а также улучшение уже известных способов. Особенно это касается аппаратной реализации, так как зачастую инструментальные ошибки измерений гораздо больше методических [20, 24]. Наиболее перспективным представляется дальнейшее развитие метода радиоакустического зондирования атмосферы (РАЗ), так как он в наибольшей степени отвечает требованиям оперативности и низкой стоимости измерений.

Физически метод РАЗ основывается на радиолокационном сопровождении пакета акустических волн, распространяющегося в атмосфере [21]. Частичное отражение радиоволны от акустической возможно в силу того, что звуковая волна, распространяясь в воздухе, модулирует плотность воздуха и, следовательно, диэлектрическую проницаемость ϵ_v . Максимальное отражение в обратном направлении наблюдается при выполнении условия Брэгга, то есть когда длина электромагнитной волны λ_e в два раза больше длины звуковой волны λ_{zv} . Регистрируя величину доплеровского смещения частоты отраженного сигнала можно определить скорость распространения звуковой волны, которая, в свою очередь, связана с температурой воздуха [31]. При двухчастотном зондировании по разности амплитуд отраженных сигналов на разных частотах возможно судить о влажности воздуха [30].

Радиоакустическое зондирование имеет ряд преимуществ по сравнению с родственными методами (акустическим, лидарным, радиолокационным). Так, акустические локаторы (содары) не позволяют получить количественную оценку индекса преломления тропосферы, лидары имеют

низкую пространственную разрешающую способность и их дальность действия сильно сокращается при наличии аэрозоля, дымки и тумана. В отличие от радиолокационного метода для РАЗ необходим значительно меньший энергетический потенциал РЛС [21], а аппаратура может быть выполнена в мобильном варианте.

Энергетические особенности эхо-сигналов при радиоакустическом зондировании атмосферы. В общем случае радиоакустическую систему зондирования можно представить как некий импульсный радиолокатор. Мощность сигнала на входе радиоприёмника такого радиолокатора определяется, как известно, соотношением [38]:

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{п}} S_{\text{а}}^2 \sigma_0}{4\pi \lambda_{\text{е}}^2 R_3^4}, \quad (10)$$

где $P_{\text{п}}$ – мощность излучённого радиоимпульса; $S_{\text{а}}$ – эффективная площадь антенны; $\lambda_{\text{е}}$ – длина рабочей электромагнитной волны; R_3 – расстояние до отражающего объекта; σ_0 – эффективная площадь поперечного сечения отражающего объекта.

Используя соотношение (10) определим уровни мощности $P_{\text{пр}}$, с которыми оперирует радиолокация “ясного неба”, нашедшая в последнее время воплощение в аппаратуре, получившей название “wind profiler” [50], и радиоакустическое зондирование.

В первом случае, поперечник рассеяния $\sigma_0 = \sigma_{\text{н}} V_{\text{н}}$, где $\sigma_{\text{н}}$ – эффективная площадь поперечного сечения единичного объёма, которая выражается следующим образом [52]:

$$\sigma_{\text{н}} = 0,38 C_{\text{н}}^2 / \sqrt[3]{\lambda_{\text{е}}}, \quad (11)$$

где $V_{\text{н}} = \frac{R_3^2 \pi^2 \lambda_{\text{е}}^2}{16 S_{\text{а}}} \frac{c_{\text{е}} \tau_{\text{и}}}{2}$ – объём, от которого эхо-сигнал приходит к радиолокатору [20].

В формуле (11) $C_{\text{н}}^2$ представляет собой структурную характеристику показателя преломления для электромагнитных волн. По экспериментальным данным в пограничном слое средняя величина $C_{\text{н}}^2 \approx 8,6 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$. Типичные значения $C_{\text{н}}^2$ в тропосфере заключены в интервале $10^{-16} \div 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$ с максимумом в приземном слое $5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^{-2/3}$ [22].

С учетом значений реальных параметров РЛС ($\lambda_{\text{е}} = 0,24 \text{ м}$, $R_3 = 1 \text{ км}$, $S_{\text{а}} = 0,85 \text{ м}^2$ и $\tau_{\text{и}} = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$), получим $\sigma_{01} \approx 6,6 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$.

Во втором случае, элементарный расчет для площади сферического искусственного переотражателя, создаваемого излучателем звука:

$$S_{3B} = 2\pi R_3^2 [1 - \cos(\theta_a / 2)], \quad (12)$$

где θ_a – ширина диаграммы излучателя звука. На дальности в 1 км при $\theta_a = 10^\circ$, которую имеет зеркальная звуковая антенна с диаметром зеркала 1 м, получим $S_a = 2,4 \cdot 10^4$ м². С учетом направленных свойств акустической зеркальной антенны, найдем величину возмущений $\Delta n/n$ создаваемых ею в воздухе.

Изменения давления, вызываемые при прохождении в воздухе звуковой волны, обозначим Δp_0 , а температуры – ΔT_B . Из выражений (1) и (2), взяв производную и перейдя к конечным приращениям, получим

$$\Delta n/n = \frac{B \Delta p_0}{B p_0 + T_B} - \frac{B p_0 \Delta T_B}{B + T_B^2}, \quad (13)$$

где B – постоянный коэффициент, равный $77,6 \cdot 10^{-6}$. Конкретизируя значения T_B и p_0 на уровне 293 °К и 1013 гПа, соответственно, перепишем (13):

$$\Delta n/n = 2,65 \cdot 10^{-7} \Delta p_0 - 9,15 \cdot 10^{-7} \Delta T_B.$$

На основании уравнения сухой адиабаты [26] можно получить выражение? связывающее ΔT_B и Δp_0 :

$$\Delta T_B = 8,28 \cdot 10^{-2} \Delta p_0. \quad (14)$$

С учётом выражения (14), преобразуем уравнение (13) к виду

$$\Delta n/n = 1,892 \cdot 10^{-7} \Delta p_0.$$

Вводя в рассмотрение характеристики акустической антенны: коэффициент усиления G_{3B} и излучаемую акустическую мощность P_{3B} , а также учитывая положение звука в воздухе α_n , величину n для значений T_B и p_0 , в окончательном виде получим

$$\Delta n = 1,893 \cdot 10^{-7} R_3^{-1} \sqrt{\frac{2}{\pi} P_{3B} G_{3B} \cdot 10^{-0,1 \alpha_n R_{\Pi}}}.$$

Отсюда, коэффициент отражения по мощности от звуковой посылки с числом длин синусоидальных звуковых волн N_B при условии выполнения соотношения Брэгга и нормальном падении на неё электромагнитного излучения, будет

$$\rho_{\Pi}^2 = 1,41 \cdot 10^{-14} N_B^2 P_{3B} G_{3B} \cdot 10^{-0,1 \alpha_n (R_3)} / R_3^2, \quad (15)$$

где $\alpha_n(R_3)$ является линейной функцией поглощения от дальности.

Численное значение ρ_n^2 получим, подставив в уравнение (15) величину поглощения звука частотой 2,8 кГц, соответствующей $\lambda_{зв} = 0,12$ м при $T_b = 293$ К, относительной влажности $u_b = 80\%$, атмосферном давлении $p_0 = 1013$ гПа и средней величине интенсивности атмосферной турбулентности ($C_n^2 \approx 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-2/3}$). В расчете α_n включены эффекты классического поглощения звука α_k (связанного с вязкими и термическими потерями); молекулярного α_m поглощения (обусловленного релаксационными процессами в многоатомном газе, каким является воздух); и добавочное поглощение α_d (связанное с рассеянием звука атмосферной турбулентностью). Вычисление первых двух слагаемых α_n производилось с использованием известного Стандарта поглощения [59] и составило 2?0 дБ/100 м. Величина α_d определялась согласно [49] по известной частоте звука для принятых выше условий и составила 0?8 дБ/100 м. При этом величину излучаемой акустической мощности полагаем равной 20 Вт, а коэффициент направленного действия акустической зеркальной антенны апертурой 0,85 м² принимаем близким к 500. В отношении числа длин волн в зондирующей звуковой посылке следует отметить, что максимальным его значением будет $N_n = 250$, когда протяжённость посылки соответствует вертикальному разрешению принятому выше равным 30 м ($\tau_n = 0,2 \cdot 10^{-6}$ с). С точки зрения “оптимальной” селективности брэгговского взаимодействия величину N_b следует ограничить на уровне $N_b = 80$. Подстановка указанных величин в уравнение (15) даёт $\rho_n^2 = 1,43 \cdot 10^{-15}$.

Эффективная площадь рассеяния искусственно создаваемой звуковой посылкой цели, согласно определению [44], равна

$$G_0 = 4\pi R_{ц}^2 \frac{\Pi_2}{\Pi_1}, \quad (16)$$

где Π_1 – плотность потока мощности падающей волны при облучении цели по нормали; Π_2 – плотность потока мощности отраженной волны. Поле вторичного излучения искусственного сферического зеркала эквивалентно полю синфазной зеркальной антенны с коэффициентом направленного действия [46]

$$G_{зв} \approx 0,5 \frac{4\pi}{\lambda_c^2} S_{зв}. \quad (17)$$

Для плотности потока мощности, отражённой от цели, будет справедливо следующее соотношение:

$$П_2 = \rho_{\Pi}^2 \Pi_1 \frac{S_{3В} G_{3В}}{4\pi R_3^2} . \quad (18)$$

На основании (12), (16), (17), (18) можно записать

$$\sigma_0 = \frac{8\pi^3 R_3^2}{\lambda_e^2} (1 - \cos \frac{\theta_a}{2})^2 \rho_{\Pi}^2 . \quad (19)$$

Для принятого значения дальности зондирования 1 км, с учётом полученного значения ρ_{Π}^2 согласно выражению (19) получим оценку величины эффективной площади рассеяния при радиоакустическом зондировании $\sigma_{02} = 8,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$.

Сопоставление полученных результатов по величине σ_0 показывает, что необходимый энергетический потенциал аппаратуры РАЗ (согласно соотношению (10)) на 40 дБ ниже, чем для метеолокатора типа “wind profiler” (W.P.). В случае радиоакустического зондирования при уровне минимального эхо-сигнала на входе радиолокационного приёмника $1 \cdot 10^{-13} \text{ Вт}$ и небольшой величине импульсной выходной мощности радиопередатчика около 0.2 кВт, аппаратура РАЗ нуждается в антенне с эффективной площадью $S_a \approx 1 \text{ м}^2$. Аппаратура W.P. с одинаковыми параметрами приёмного и передающего устройств требует антенны с эффективной площадью $S_a \approx 132 \text{ м}^2$, согласно уравнению (10). Полученное значение S_a можно считать минимально необходимым, при котором работа аппаратуры W.P. возможна, когда значение $C_n^2 \geq 8,6 \cdot 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$. В условиях слаборазвитой атмосферной турбулентности, когда, как известно $C_n^2 \approx 1 \cdot 10^{-16} \text{ м}^{-2/3}$ работоспособность аппаратуры будет обеспечена, если эффективная площадь антенны будет увеличена до 1224 м^2 . Таким образом, ввиду значительных величин S_a аппаратура W.P. может быть реализована только в стационарном варианте. Аппаратура радиоакустического зондирования вполне реализуема в мобильном варианте.

Одной из основных проблем при измерении температуры воздуха с помощью радиоакустического зондирования является то, что максимальная амплитуда отраженного сигнала достигается при точном выполнении условия брэгговского резонанса. Если это условие не выполняется, то амплитуда сигнала на входе приемника резко падает. Для выполнения условия Брэгга вдоль всей трассы локации, можно, на первый взгляд, производить

подстройку частоты электромагнитного излучения [53]. В условиях реальной атмосферы, когда под воздействием динамической турбулентности наблюдаются глубокие замирания эхо-сигнала на трассе зондирования возможны частые “срывы” автоподстройки, нарушающие работоспособность аппаратуры [13]. Кроме того, введение в задающий генератор частоты электромагнитного излучения элементов подстройки снижает его кратковременную стабильность, требования к которой весьма высоки (обычно не хуже $1 \cdot 10^{-10}$). Практическая проверка способа подтвердила наличие указанных его недостатков, ограничив удовлетворительное его использование, как отмечают авторы разработки, условиями штиля или ветрового потока близкого к ламинарному. Малопригодность способа радиоакустического зондирования с фазовой автоподстройкой частоты электромагнитного излучения для целей практического использования связана, главным образом, с точностными ограничениями по измерению разности фаз $\Delta\varphi_d$ с помощью применяемых фазовых измерителей компенсационно-следающего типа.

Очевидно, что относительная погрешность установки фазы связана с относительной нестабильностью частоты следующим образом:

$$\frac{\Delta\varphi_d}{\varphi_d} = \frac{\Delta(\omega_d t)}{\omega_d t} = \frac{\Delta(F_d t)}{F_d t} = \frac{t\Delta F_d + F_d \Delta t}{F_d t} = \frac{\Delta F_d}{F_d} + \frac{\Delta t}{t}. \quad (20)$$

Некой оптимистической оценкой $\Delta F_d / F_d$ будет предположение приближения к нулю времени нестабильности. Тогда выражение (20) получит вид:

$$\Delta\varphi_d / \varphi_d \approx \Delta F_d / F_d. \quad (21)$$

Таким образом, мы предполагаем заранее, что $\Delta t / t_c \ll \Delta F_d / F_d$ и, тем самым пренебрегаем ошибкой фазы связанной с временной нестабильностью системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Погрешности определения температуры аппаратурой РАЗ $\delta T \leq 0,2$ К соответствует значение требуемой величины $\Delta F_d / F_d \leq 3,5 \cdot 10^{-4}$ при $F_d \approx 2,8$ кГц. Для обеспечения, согласно (21), величины $\Delta\varphi_d / \varphi_d \approx 3,5 \cdot 10^{-4}$ при реальной шумовой полосе $\Delta F_{шд} \approx 20$ Гц, которой обладают синхронные доплеровские фильтры аппаратуры РАЗ [13], требуемое значение отношения сигнал/шум ($P_c / P_{ш}$) на входе фазового детектора, подключенного к выходу радиоприёмника РАЗ составит согласно [3]:

$$P_c / P_{ш} = \sqrt{\Delta F_{шд}} / \Delta\varphi_d \approx 142. \quad (22)$$

Результат свидетельствует о невозможности обеспечения требуемого значения $\Delta\varphi_d / \varphi_d$ на практике. С учётом реального значения

$P_c/P_{ш} = 6$ дБ для тех же параметров получим из (22) $\Delta\varphi = 1,1^\circ$. Это означает, что погрешность определения температуры составит около 7 К. Таким образом, даже при оптимистической оценке величины погрешности ФАПЧ для аппаратуры РАЗ с автоподстройкой частоты точность определения температуры оказывается недопустимо низкой.

Найдем диапазон частот, в пределах которого нужно производить подстройку несущей частоты радиосигнала, чтобы обеспечить выполнение условия Брэгга вдоль всей трассы зондирования.

Пусть температура воздуха у поверхности Земли равна T_0 , а высота зондирования равна H_{\max} . В стандартной атмосфере температурный градиент $\gamma_T = -6,5^\circ\text{C}/\text{км}$, и температура на максимальной высоте зондирования будет равна

$$T_{H_{\max}} = T_0 + \gamma_T H_{\max}.$$

Длину звуковой волны λ_s можно найти как [21]

$$\lambda_{зв} = v_{зв} / f_{зв} = A \sqrt{T_B} / f_{зв}, \quad (23)$$

где $v_{зв}$ и $f_{зв}$ – скорость и частота звука, $A = 20,053 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-1/2}$.

С учетом (23) длину звуковых волн у поверхности Земли и на максимальной высоте зондирования найдем как

$$\lambda_{звT_0} = A \sqrt{T_0} / f_{зв} \quad \text{и} \quad \lambda_{звT_{H_{\max}}} = A \sqrt{T_{H_{\max}}} / f_{зв}. \quad (24)$$

Исходя из условия Брэгга и учитывая (24) для электромагнитных волн получаем необходимые значения радиочастот

$$f_{eT_0} = \frac{c}{\lambda_{eT_0}} = \frac{cf_{зв}}{2A\sqrt{T_0}} \quad \text{и} \quad f_{eT_{H_{\max}}} = \frac{c}{\lambda_{eT_{H_{\max}}}} = \frac{cf_{зв}}{A\sqrt{T_{H_{\max}}}},$$

где $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – скорость света.

Относительное изменение частоты (расстройка), необходимое для выполнения условия Брэгга вдоль всей дистанции зондирования найдем как

$$\delta f_e = \left(f_{eT_{H_{\max}}} - f_{eT_0} \right) / f_{eT_0} = \sqrt{T_0} / \sqrt{T_0 + \gamma_T H_{\max}} - 1. \quad (25)$$

Если $T_0 = 273 \text{ К}$ (0°C), а $H_{\max} = 2 \text{ км}$, то для получения максимального отраженного сигнала вдоль всей трассы локации необходимо обеспечить $\delta f_e \approx 2.5\%$.

Исследуем связь между мощностью принимаемого сигнала и расстройкой частоты δf_e .

Мощность сигнала, отраженного от звукового пакета равна [21]:

$$P_{\text{пр}} = B_0 \frac{P_{\text{п}} P_{\text{зв}} N_{\text{в}}^2}{R_3^2} \frac{G_{\text{зв}} G_{\text{п}} G_{\text{пр}}}{(G_{\text{п}} + G_{\text{зв}} + G_{\text{пр}}) (G_{\text{п}}/2 + G_{\text{зв}}/2 + G_{\text{пр}})} e^{-\int_0^{R_3} \alpha_{\Sigma}(r) dr},$$

где $B_0 \approx 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2/\text{Вт}$; $P_{\text{зв}}$ – излучаемая мощность источника звука; R_3 – дальность, с которой принимается сигнал; $G_{\text{пер}}$, $G_{\text{пр}}$, $G_{\text{зв}}$ – коэффициент усиления передающей и приемной радиоантенн и акустической антенны соответственно; α_{Σ} – коэффициент полного поглощения звука в атмосфере, нп.

Если считать, что α_{Σ} не зависит от высоты, то

$$P_{\text{пр}} = B_0 \frac{P_{\text{п}} P_{\text{зв}} N_{\text{в}}^2}{R_3^2} \frac{G_{\text{зв}} G_{\text{п}} G_{\text{пр}}}{(G_{\text{п}} + G_{\text{зв}} + G_{\text{пр}}) (G_{\text{п}}/2 + G_{\text{зв}}/2 + G_{\text{пр}})} e^{-\alpha_{\Sigma} R_3}. \quad (26)$$

Согласно [21]

$$P_{\text{пр}} / P_{\text{пр}0} = N_{\text{в}}^2 \exp \left(-4\pi^2 N_{\text{в}}^2 \left[\frac{2\lambda_{\text{зв}}}{\lambda_{\text{е}}} - 1 \right]^2 \right),$$

где $P_{\text{пр}0}$ – принимаемая мощность для звукового пакета единичной длины, откуда

$$P_{\text{пр}} / P_{\text{пр}0} = N_{\text{в}}^2 \exp \left(-4\pi^2 N_{\text{в}}^2 \delta f_{\text{е}}^2 \right). \quad (27)$$

Графики, иллюстрирующие выражение (27), приведены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, при большом количестве звуковых импульсов в пакете, увеличение расстройки приводит к резкому уменьшению амплитуды принимаемого сигнала. Таким образом, в условиях неустойчивой атмосферы применять длинные звуковые пакеты нецелесообразно.

Пусть допустимое

уменьшение мощности принимаемого сигнала вдоль всей трассы локации не превосходит двух раз. Тогда, исходя из (27), находим величину расстройки в зависимости от длины звукового пакета

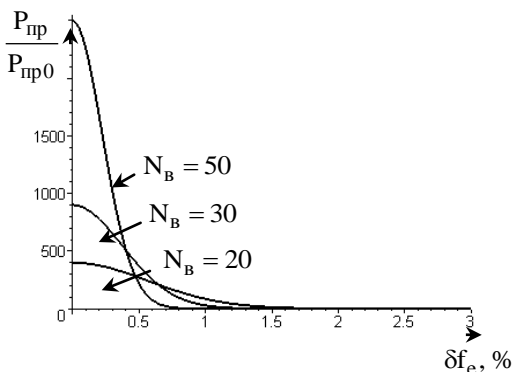


Рис. 2. Зависимость нормированной мощности принимаемого сигнала от величины расстройки $\delta f_{\text{е}}$ относительно условия Брэгга для различного числа звуковых импульсов в пакете $N_{\text{в}}$

$$\delta f_e = \sqrt{\ln 2} / 2\pi N_B. \quad (28)$$

С учетом выражений (25) и (28) получаем зависимость максимальной высоты радиоакустического зондирования атмосферы в стандартных условиях от длины звукового пакета без дополнительной подстройки под условие Брэгга

$$N_{\max}^{\wedge}, \text{ км} = -\frac{T_0(4\pi N_B \sqrt{\ln 2} + \ln 2)}{\gamma_T(2\pi N_B + \sqrt{\ln 2})^2}. \quad (29)$$

График, иллюстрирующий выражение (29) приведен на рис. 3.

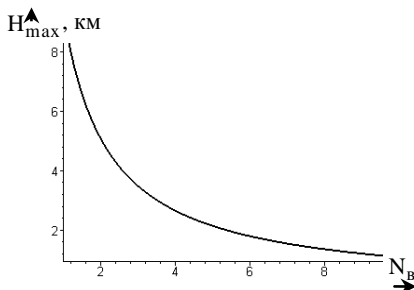


Рис.3. Зависимость высоты зондирования от длины звукового пакета

Из рис. 3 следует, что для проведения измерений в интересующем нас высотном интервале необходимо применять короткие звуковые пакеты из 2 – 5 импульсов. Так как N_B в выражение (26) входит в знаменатель, то целесообразно использовать максимальное значение из указанного диапазона.

Произведем расчет мощности принимаемого сигнала для коротких звуковых пакетов ($N_B = 2-5$). В выражении (26) коэффициенты усиления антенн и коэффициент поглощения звука по-разному зависят от частоты, поэтому предварительно найдем частоту, мощность сигнала на которой будет максимальна.

Акустические антенны имеют небольшой коэффициент усиления, который слабо зависит от частоты [51]. Передающую и приемную антенны будем считать одинаковыми, тогда их коэффициент усиления можно найти как [8]

$$G_{\Pi} = G_{\text{пр}} = \frac{4\pi}{\lambda_e^2} A_{\Gamma} g_A, \quad (30)$$

где A_{Γ} – площадь раскрыва антенны, g_A – коэффициент использования раскрыва антенны.

Исходя из (26) и с учетом (23) и (30) для радиоантенн в виде параболических вращений получаем для мощности отраженного сигнала выражение

$$P_{\text{пр}} = B_0 \frac{P_{\Pi} P_{3B} N_B^2 G_{3B}}{R_3^2} \cdot e^{-\alpha_{\Sigma}(f_{3B}) R_3} \times \\ \times \frac{\pi^4 f_{3B}^4 d_e^4 g_A^2}{A^4 T_0^2 \left(\left(\pi^2 f_{3B}^2 d_e^2 g_A \right) / \left(2A^2 T_0 \right) + G_{3B} \right) \left(\left(3\pi^2 f_{3B}^2 d_e^2 g_A \right) / \left(8A^2 T_0 \right) + 0,5 \cdot G_{3B} \right)},$$

где d_e – диаметр передающей и приемной радиоантенн.

Максимальная отраженная мощность будет на частотах, значения которых являются корнями уравнения

$$dP_{\text{пр}}/df_{\text{зв}} = 0. \quad (31)$$

Численно решая уравнение (31) относительно $f_{\text{зв}}$ для $G_{\text{зв}}=1$, $d_e=1$, $g_A=0,5$ получаем $f_{\text{зв}}^{\text{опт}} \approx 370$ Гц ($\lambda_{\text{зв}}^{\text{опт}} \approx 90$ см). Разрешающая способность по высоте составляет $\Delta z \approx 4.5$ м. При излучаемой звуковой и электромагнитной мощности по 1 Вт мощность отраженного сигнала составит $P_{\text{пр}} \approx 6 \cdot 10^{-21}$ Вт, что требует принятия специальных мер по развязке приемной и передающей антенн [8, 48, 54] или переходу к импульсному электромагнитному излучению.

Для увеличения мощности принимаемого сигнала, можно использовать акустические излучатели большой мощности [5]. Возможным препятствием на пути их применения может быть нелинейное поглощение мощных звуковых волн в атмосфере. Поэтому произведем оценку допустимого уровня используемой звуковой мощности.

В инженерных оценках полагают, что акустическая мощность не должна превышать величины $P_{\text{зв}}^{\text{max}}$ [21]

$$P_{\text{зв}}^{\text{max}} \approx 1175 \cdot \lambda_{\text{зв}}^2 / S_{\text{зв изл}},$$

где $S_{\text{зв изл}}$ – площадь звукового излучателя.

В [5] указывается, что площади плазменного излучателя может составлять порядка 18 см^2 при излучаемой мощности $P_{\text{зв}}^{\text{ПлазмИзл}} = 800$ Вт.

При длине звуковой волны $\lambda_{\text{зв}} \approx 0,9$ м в таком случае получаем $P_{\text{зв}}^{\text{max}} \gg P_{\text{зв}}^{\text{ПлазмИзл}}$ и нелинейного поглощения звука не будет.

Пути совершенствования систем радиоакустического зондирования тропосферы. Указанный выше метод двухчастотного РАЗ позволяет измерять температуру с точностью до 0,2 К, а влажность – $3 \div 4\%$ [43, 56, 57]. Однако такие точностные возможности реализуются при устойчивой атмосфере и слабом ветре, поэтому реальные ошибки будут значительно больше. Для исключения ошибки, вызванной ветровым сносом зондируемого объема воздуха, необходимо в процессе опыта измерять также вертикальную и горизонтальные составляющие вектора скорости ветра.

Ветровая рефракция звука при радиоакустическом зондировании выражается в сносе звуковой зондирующей посылке по ветру и ее развороте в противоположном сносу направлении. В практике радиоакустического зондирования атмосферы нашли применение такие способы ветро-

вой адаптации, как смещение по ветру приемной радиолокационной антенны или против ветра антенны звукового излучателя, а также применение большого числа разнесенных по поверхности приемных радиолокационных или звуковых антенн. Первые два способа связаны с механическим перемещением антенн радиоакустической аппаратуры, что существенно снижает оперативность зондирования. Реализация вторых двух способов связана со значительным удорожанием аппаратуры радиоакустического зондирования и лишением ее мобильности.

Наибольшей привлекательностью для построения мобильных радиоакустических систем радиофизического мониторинга нижней тропосферы является обособленно стоящий способ ветровой адаптации при наклонном зондировании [32]. Только при работе радиоакустической аппаратуры по этому способу возможна полная ветровая адаптация при сохранении мобильности системы. Нужно заметить, что в этом случае дополнительно могут быть получены данные о профилях скорости и направления горизонтального ветра.

Основой способа наклонного радиоакустического зондирования является физический эффект, связанный с ветровой деформацией акустического волнового фронта при его распространении в атмосфере. В результате ветрового воздействия сферический волновой акустический фронт принимает форму сплюсненной и вытянутой по направлению ветра эллипсоидной поверхности. На этой поверхности имеются две области, обладающие свойством отражать и фокусировать отраженные радиоволны в точку излучения звуковых и электромагнитных колебаний. Обе области пересекаются азимутальной плоскостью, в которой лежит локальный горизонтальный вектор ветра. При излучении и приеме радиоимпульсов из одной и той же точки в противоположных направлениях, в плоскости локального горизонтального ветра, т.е. по ветру и против ветра, доплеровский сдвиг отраженных радиосигналов оказывается предельно возможным ($\Omega_{д\max}$ и $\Omega_{д\min}$) по сравнению с зондированием в других азимутальных плоскостях. При круговом зондировании, выбирая значение азимута, для которого разность доплеровских сдвигов достигает максимума ($\Delta\Omega_{д\max} = \Omega_{д\max} - \Omega_{д\min}$) можно найти величину локального горизонтального ветра по формуле $V_r = \lambda_e \Delta\Omega_{д\max} / (8\pi \sin \alpha)$.

Согласно результатам численного моделирования [58], с учетом реальных профилей горизонтальной скорости ветра над сушей, углы места точек максимального отражения составляют $\Theta = 45 \pm 15^\circ$. Этот результат хорошо согласуется с частными случаями, экспериментально проверенными в работах [25] и [55].

Обратимся к способам реализации возможности радиоакустического зондирования по измерению влажности воздуха.

Единственным, реализованным на практике, радиоакустическим способом определения влажности воздуха в нижних слоях атмосферы является способ двухчастотного РАЗ, о котором впервые сообщается в [42]. Физической основой этого способа является зависимость молекулярного поглощения звука от влажности воздуха, температуры и частоты. Проведя зондирование на частотах звука, выбираемых в интервале 3 – 30 кГц, где молекулярное поглощение является преобладающим, измеряют отношение мощностей принятых эхо-сигналов [56]. Определение влажности при этом сводится к последующему ее расчету по полученным методом РАЗ значениям разности поглощений в слое при известных теоретических зависимостях поглощения звука заданной частоты в воздухе и температуре воздуха по формуле:

$$\alpha_{\Sigma 2}(R_3) - \alpha_{\Sigma 1}(R_3) = \Delta\alpha_{\Sigma 21} = \frac{P_{\text{пр}2}(R_3)}{P_{\text{пр}2}(R_3)} \frac{d}{dR_3} \left[\frac{P_{\text{пр}2}(R_3)}{P_{\text{пр}2}(R_3)} \right],$$

где $\Delta\alpha_{\Sigma 21}$ – искомое значение разности поглощений для выбранных значений рабочих частот звука $f_{\text{зв}1}$ и $f_{\text{зв}2}$ [59]. Выражение для среднеквадратической погрешности определения влажности воздуха имеет вид

$$\sigma_u = \frac{\partial u}{\partial \Delta\alpha_{1,2}} \sigma_{P_1/P_j} \frac{1}{\Delta R_3} \sqrt{(P_{11}/P_{j1})^2 + (P_{12}/P_{j2})^2}.$$

Проведенный анализ авторами анализ методической погрешности [38] свидетельствует о возможности его практического использования. Так, показано, что с помощью аппаратуры двухчастотного РАЗ, работающей на частотах звука 3.4 и 6.8 кГц (когда $R_{3\text{max}} \approx 300$ м), при $\Delta R_3 = 20$ м, $T_{\text{в}} = 20^\circ\text{C}$, относительной влажности $u = 70\%$ и погрешности измерения отношения мощностей $\sigma_P = 0.4$ дБ, можно обеспечить погрешность измерения влажности σ_u на уровне 2,5%. С уменьшением u до 40% величина σ_u упадет до 1%, а повышением u до 90% возрастет до 5%.

Экспериментально установлено, что фактором, ограничивающим точность определения влажности с помощью данного способа, является динамическая турбулентность. Усиление коэффициента турбулентности сверх 8 – 10 м²/с приводит к резкому росту случайной погрешности измерения влажности ввиду разрушения регулярной структуры отражающих слоев, создаваемых звуковыми зондирующими посылками.

Задача существенного расширения атмосферных условий применимости при сохранении высокой точности измерения влажности воздуха решается в радиоакустическом способе, основанном на использовании

широкополосного импульсного акустического излучения, приеме эхо-сигналов на нескольких кратных частотах электромагнитных колебаний с последующей регистрацией текущего сдвига фаз на разных доплеровских частотах [33]. Здесь сдвиг фаз обусловлен взаимодействием звука с молекулами воздуха, а потому зависит только от влажности атмосферы и не зависит от динамической и температурной турбулентности.

Основой этого способа радиоакустического зондирования является ранее не использованный физический эффект обратного рассеяния электромагнитной волны акустическим пакетом, образующим тонкие слои уплотнения воздуха (с увеличенной диэлектрической проницаемостью), нормальные к направлению распространения и разнесенные на расстояние, кратное половине длины электромагнитной волны. При облучении такого пакета электромагнитной посылкой из k кратных радиочастот (для которых между слоями уплотнения воздуха укладывается одна или несколько полуволн) эхо-сигналы возникают на этих радиочастотах, что соответствует их взаимодействию с k звуковыми гармониками.

Ниже приведены соотношения для определения влажности воздуха по измерению сдвига фаз эхо-сигналов при многочастотном радиоакустическом зондировании с использованием импульсного источника звука.

Согласно [41] дисперсию скорости звука в воздухе характеризуют величиной

$$\delta c_{зв} / c_{зв} = (c_{зв \infty} - c_{зв0}) / c_{зв0},$$

где $c_{зв0}$ и $c_{зв \infty}$ – скорость звука для очень малых и очень больших частот; величина $\delta c_{зв} / c_{зв} \leq 0,032\%$. Теперь зависимость скорости звука от частоты [6] можно записать в виде

$$c_{зв} = c_{зв0} \sqrt{1 + 6,4 \cdot 10^{-5} \cdot (f / f_p)^2 / (1 + (f / f_p)^2)}, \quad (32)$$

где f_p – частота релаксации, величина которой определяется выражением

$$f_p = (p / p_0) \left(24 + 4,41 \cdot 10^4 u \frac{0,05 + u}{0,391 + u} \right), \quad p_0 = 1013 \text{ мбар}. \quad (33)$$

Из формул (32), (33) получим зависимость фазового сдвига $\Delta\varphi$ от дальности зондирования R_z для эхо-сигналов, полученных зондированием на звуковой частоте f , относительно опорной частоты f_0 , на которой дисперсионный эффект пренебрежимо мал.

Обозначим второе слагаемое под корнем в выражении (32) как ψ ; вследствие малости величины ψ можем записать:

$$c_{3B} = c_{3B0} + \Delta c_{3B} = c_{3B0} \sqrt{1 + \psi} \approx c_{3B0} (1 + \psi/2), \text{ откуда } \Delta c_{3B} / c_{3B0} = \psi/2.$$

По определению частоты $2\pi f = -\Delta\varphi / \Delta t$; $t = R_3 / c_{3B}$; $\Delta t / \Delta c_{3B} = -R_3 / c_{3B}^2$,
отсюда $2\pi f = -\Delta\varphi c_{3B}^2 / (R_3 \Delta c_{3B})$ и $R_3 = -\Delta\varphi c_{3B} / (\pi f \psi)$.

Подставим в последнее выражение $\Delta\varphi = \Delta\varphi^\circ \cdot \pi/180^\circ$, получаем:

$$R_3(\Delta\varphi, f, f_p) = \frac{8,68 \Delta\varphi^\circ \left[1 + (f/f_p)^2 \right] c_{3B}}{f (f/f_p)^2} \text{ или } \Delta\varphi^\circ = \frac{R_3 f (f/f_p)^2}{8,68 c_{3B} \left[1 + (f/f_p)^2 \right]}.$$

Упростим последнюю формулу, учтя в ней неравенство $(f/f_p)^2 \ll 1$, отражающее реально существующие в атмосфере величины влажностей:

$$\Delta\varphi^\circ = \frac{R_3 f^3}{8,68 c_{3B} f_p^2},$$

где c_{3B} – скорость звука, средняя на дистанции зондирования R_3 .

При излучении акустического пакета с двумя кратными частотами $f = F_{3B1}$, kF_{3B1} разность фаз эхо-сигналов для расстояния зондирования R_3 равна

$$\Delta\varphi_1^\circ = \frac{R_3 F_{3B1}^3}{8,68 c_{3B} f_{p1}^2} (k^3 - 1), \text{ откуда } f_{p1} = \sqrt{\frac{R_3 F_{3B1}^3}{8,68 c_{3B} \Delta\varphi_1^\circ} (k^3 - 1)}. \quad (34)$$

Пусть для расстояния зондирования $R_3 - \Delta R_3$ получены эхо-сигналы с двумя кратными частотами $f = F_{3B1}$, lF_{3B1} . Разность фаз эхо-сигналов равна

$$\Delta\varphi_2^\circ = \frac{(R_3 - \Delta R_3) F_{3B1}^3}{8,68 c_{3B} f_{p2}^2} (l^3 - 1), \text{ откуда } f_{p2} = \sqrt{\frac{(R_3 - \Delta R_3) F_{3B1}^3}{8,68 c_{3B} \Delta\varphi_2^\circ} (l^3 - 1)}.$$

Подставим в квадратное уравнение (33) значения $f_p = f_{p1}$ и получим решение для величин влажности u_1 (усредненной на расстоянии зондирования R_3) и u_2 (усредненной на расстоянии зондирования $R_3 - \Delta R_3$):

$$u_1 = \int_0^{R_3} u(r) dr = \int_0^{R_3 - \Delta R_3} u(r) dr + \int_{R_3 - \Delta R_3}^{R_3} u(r) dr; \quad u_2 = \int_0^{R_3 - \Delta R_3} u(r) dr.$$

Двузначность решения квадратного уравнения (33) устраняем с помощью измерений приземного значения влажности u_0 и последующего итеративного перехода к остальным высотам зондирования с учетом высотного профиля температуры. Это оказывается возможным благодаря небольшому изменению влажности с высотой.

Из последних двух соотношений получаем среднюю влажность в слое толщиной ΔR_3 от $R_3 - \Delta R_3$ до R_3 , которую припишем расстоянию зондирования $R_3 - \Delta R_3 / 2$,

$$u = \int_{R_3 - \Delta R_3}^{R_3} u(r) dr = u_1 - u_2 .$$

Базируясь на величине аппаратной погрешности измерения фазовых сдвигов 0.5° для нормальных атмосферных условий и звукового зондирующего излучения с набором частот 2, 4, 6, 8, 10 кГц мы произвели расчеты $\Delta\varphi_{1\max}$ по выражению (34) для $R_{3\max}$, найденному по данным приведенным в [21]. Сведенные в табл. 3 полученные данные свидетельствуют в пользу перспективной практической реализуемости рассмотренного радиоакустического способа определения влажности воздуха. Из табл. 3 видно, что, при многочастотном радиоакустическом зондировании атмосферы, принимая эхо-сигналы с разных высот, можно получить сдвиги фаз, которые надежно измеряются современной аппаратурой. При этом, зондирование в нижней части рабочего диапазона высот проводится, например, на первой и пятой гармониках спектра звуковой импульсной посылки, а в верхней – на первой и второй. Это позволяет получить одинаково большие разности фаз на больших и малых высотах и таким образом уменьшить вклад неточности измерения малых разностей фаз при вычислении влажности воздуха.

Таблица 3

Разность фаз сигналов, отраженных от звуковых посылок на кратных частотах

Пары частот $F_{зв0} - kF_{зв0}$, кГц	2 – 4	2 – 6	2 – 8	2 – 10
$\lambda_{зв}/k$, см	17	11,4	8,5	6,8
$R_{3\max}$, м	550	450	300	200
$\Delta\varphi_{1\max}$, °	2,4	7,3	11,7	15,4
$R_{3\max}$, м при $\Delta\varphi_{1\max} = 2^\circ$	460	125	52	26

В данном способе радиоакустического измерения влажности воздуха погрешность существенно снижена благодаря использованию многочастотных зондирующих посылок, так как пространственно-временная изменчивость атмосферы одинаково влияет на прохождение акустических и электромагнитных сигналов разных частот, а потому принятые разности фаз практически не зависят от вариаций параметров атмосферы.

Изложенные сведения по способам радиоакустического зондирования и проведенный анализ их возможностей позволяют составить общее

представление о построении современного мобильного радиоакустического комплекса аппаратного комплекса радиофизического применения.

На рис. 4 приведена укрупненная структурная схема радиоакустического аппаратного комплекса радиофизического применения.

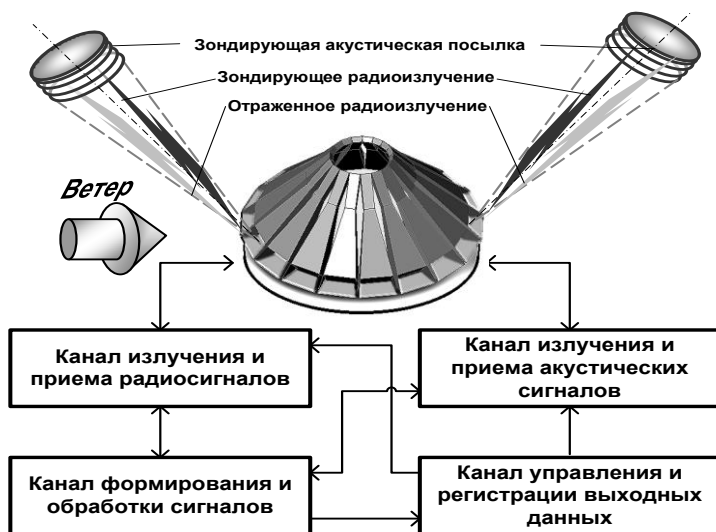


Рис. 4. Структурная схема мобильного радиоакустического комплекса радиофизического применения, реализующей способ наклонного адаптивного к ветру зондирования, с кольцевой акусто-электромагнитной антенной

В комплексе (рис. 4) реализована ветровая адаптация по способу наклонного радиоакустического зондирования. Этой цели служит кольцевая комбинированная широкополосная акусто-электромагнитная антенна [34], в которую входит 18 отдельных комбинированных рупорно-параболических антенн. В качестве источника акустических импульсов в каждой антенне используется искровой электроакустический излучатель, например, аналогичный описанному в [21]. Канал излучения и приема радиосигналов является много частотным, сопряженным с частотами канала излучения и приема акустических сигналов. В канале формирования и обработки сигналов производится формирование сигналов зондирующих электромагнитного и звукового излучений, обработка принятых эхосигналов и последующее вычисление профилей показателя преломления на основании данных по высотному ходу температуры, и влажности воздуха. Управление работой комплекса осуществляется через канал управления, в число задач которого входит также регистрация выходных данных.

Выводы. 1. Для оперативной диагностики тропосферных волноводов в интересах, например, радиолокации под малыми углами места, необходим метод, который бы позволял производить измерения индекса преломления тропосферы с ошибкой не более 1 N-единицы, в диапазоне высот от 12 м до 2 км, с дискретностью по высоте 4 метра, за время не более 10 минут, при ветре в приземном слое до 5 м/с. Стоимость измерений должна быть низкой по сравнению с традиционными радиозондовыми измерениями, а аппаратура – мобильной. В наибольшей степени этим требованиям отвечает метод радиоакустического зондирования атмосферы.

2. В системах вертикального РАЗ с непрерывным радиоизлучением применение устройств АПЧ нецелесообразно ввиду ухудшения кратковременной стабильности параметров излучаемых сигналов. Предпочтительно использовать короткие звуковые пакеты из 2 – 5 импульсов, выбирать оптимальные рабочие частоты в зависимости от высоты зондирования и метеорологической ситуации, а также применять мощные звуковые излучатели немеханического типа.

3. С целью ветровой адаптации аппаратуры радиоакустического зондирования без ущерба ее мобильности и для сохранения оперативности целесообразно использовать способ наклонного зондирования с кольцевой комбинированной акусто-электромагнитной антенной.

4. Наибольшей точности определения влажности можно достичь при работе аппаратуры РАЗ в многочастотном режиме с импульсным источником звука регистрируя величину разности фаз для кратных частот эхо-сигналов.

5. С целью исключения дополнительной погрешности измерения температуры воздуха, вносимой вертикальной составляющей скорости ветра, необходимо в расчетах использовать данные наклонного зондирования для двух противоположных направлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александр Ф.О. некоторых случаях сверхдальней радиолокационной видимости в окрестностях Новой Зеландии // *Распространение сантиметровых радиоволн в тропосфере.* – М.: Изд. ин. лит. – 1950. – С. 352 – 373.
2. Андрианов В.А. Распространение радиоволн в пограничном слое атмосферы // *Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника.* – М.: ВИНТИ, 1994. – Т.44. – С. 3 – 80.
3. Астафьев Г.П., Шебшаевич В.С., Юрков Ю.А. *Радиотехнические средства навигации летательных аппаратов.* – М: Сов. радио, 1962. – 961 с.
4. Бендат Дж., Пирсол А. *Измерение и анализ случайных процессов: Пер. с англ. / Под ред. И.Н. Коваленко.* – М.: Мир, 1971. – 408 с.

5. Бочкарев Н.Н, Красненко Н.П., Нетребя П.И., Тоболкин А.С. Плазменный излучатель звука в задачах атмосферной акустики // Распространение звуков и оптических волн в атмосфере. – Томск. – 1988. – С. 93 – 96.
6. Бергман Л. Ультразвук и его применение в технике. – М.: Мир, 1957. – 240 с.
7. Бин Б.Р., Даттон Е.Дж. Радиометеорология. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 368 с.
8. Буренин Н.И., Поповский В.В. Проблемы и методы обеспечения электромагнитной совместимости с помощью антенной техники. Обзор. // Антенны – М.: Радио и связь. – 1990. – С. 107 – 124.
9. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 263 с.
10. Василенко Н.А. Определение профилей температуры и давления атмосферы по измерениям астрономической рефракции вблизи горизонта // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1986. – № 10. – С. 1026 – 1033.
11. Гайкович К.П., Сулин М.И. О восстановлении высотных профилей показателя преломления, давления и температуры атмосферы по наблюдениям астрономической рефракции // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1986. – № 9. – С. 917 – 924.
12. Голев К.В. Расчет дальности действия радиолокационных станций. – М.: Сов. радио, 1962. – 204 с.
13. Горелик А.Г., Жежерин В.Р., Калистратова М.А. и др. Радиоакустическое зондирование атмосферного пограничного слоя с автоподстройкой частоты // Метеорологические исследования. – 1987. – № 28. – С. 82 – 92.
14. Дарст С. Радиоклиматология // Распространение сантиметровых радиоволн в тропосфере. – М.: Изд. ин. лит. – 1950. – С. 352 – 373.
15. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. – М.: Сов. радио, 1972. – 336 с.
16. Иванов В.А., Ильницкий Л.Я., Фузик М.И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. – К.: Техніка, 1983. – 120 с.
17. Исмару А. Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах. – М.: Мир, 1981. – 317 с.
18. Использование радиочастотного спектра и радиопомехи / Е.И. Егоров, Н.И. Калашников, А.С. Михайлов. – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
19. Исследование влияния точности определения параметров М-профиля на расчетные значения ослабления электромагнитного поля в атмосферном волноводе / Красюк И. П., Крестников Л. А., Родос Л. Я. // Расчет, конструирование и технология производства устройств СВЧ. – 1977. – С. 104 – 108.
20. Казаков Л.Я., Ломакин А.Н. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. – М.: Наука, 1976. – 165 с.
21. Калистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. – М.: Наука, 1985. – 197 с.
22. Копров Б.М. Изменчивость показателей преломления радио- и акустических волн при вариациях влажности и температуры / Изв. АН СССР. ФАО. – 1981. – Т.17, №8. – С. 869 – 872.
23. Красюк Н.П., Коблов В.Л., Красюк В.Н. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС. – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.

24. Максимова Н.Г. Современное состояние дистанционного зондирования атмосферного пограничного слоя с поверхности Земли (методы исследования, наиболее важные результаты) // Радиотехника. – 1998. – Вып. 10. – С. 43 – 57.
25. Масуда Ё. Техника дистанционного исследования атмосферы с использованием звуковых волн // Кихон онкё гакайси. – 1987. – Т. 43, № 6. – С. 425 – 430.
26. Матвеев Л.Г. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 751 с.
27. Менцел Д. Зависимость условий распространения радиоволн от метеорологической обстановки // Распространение сантиметровых радиоволн в тропосфере. – М.: Изд. ин. лит. – 1950. – С. 374 – 381.
28. Михайлов Н.Ф., Рыжков А.В., Щукин Г.Г. Радиометеорологические исследования над морем. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 207 с.
29. Образцов С.П., Щукин Г.Г. СВЧ и ИК-радиометрические методы восстановления характеристик атмосферы и подстилающей поверхности // Зарубежная радиоэлектроника. – 2002. – №9. – С. 44 – 52
30. Орлов М.Ю., Юрчак Б.С. О возможности определения влажности в приземном слое атмосферы радиоакустическим способом // Труды института экспериментальной метеорологии. – 1985. – № 38/121. – С. 14 – 20.
31. Орлов М.Ю., Юрчак Б.С. Точность измерения температуры и компонент ветра радиоакустическим методом // Труды института экспериментальной метеорологии. – 1978. – № 9/72. – С. 128 – 140.
32. Патент Российской Федерации №2152055 от 27.06.2000 Приоритет от 9.07.99 Способ радиоакустического наклонного зондирования атмосферы / Ю.Н. Ульянов, В.И. Ветров., В.С. Скворцов С.В. Бутакова.
33. Патент Российской Федерации №2196345 от 10.01.2003. Способ радиоакустического зондирования атмосферы / Ю.Н. Ульянов, В.И. Ветров., В.С. Скворцов С.В. Бутакова.
34. Подольян Л.М. Широкополосный электроискровой излучатель для систем радиоакустического зондирования // Тез. докл. VII Всесоюзного симп. по лазерному и акустическому зондир. атмосферы. – Ч. 2. – Томск. – 1982. – С. 260 – 263.
35. Распространение радиоволн в тропосфере: Обзор / Г.В. Хитни, Ю.Х. Рихтер и др. // ТИИЭР. – 1985. – Т. 73, № 2. – С. 106 – 128.
36. Распространение ультракоротких радиоволн: Пер. с англ. / Под ред. Б.А. Шиллерова. – М.: Сов. радио, 1954. – 564 с.
37. Решетов В.Д. Изменчивость метеорологических элементов в атмосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 215 с.
38. Справочник по радиолокации / Под. ред. М. Скольника. – Т. 1. Основы радиолокации. – М.: Сов. радио, 1976. – 455 с.
39. Сухонин Е.В. Оперативное прогнозирование рабочих характеристик мало-высотных РЛС на основе данных по коэффициентам преломления атмосферы // Радиотехника сверхвысоких частот, ЭИ. – 1990. – № 44. – С. 1 – 5.
40. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана - М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.
41. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. – М.: Сов. энциклопедия, 1979. – 400 с.

42. Ульянов Ю.Н. Двухчастотная радиоакустическая система // Тез. докл. VII Всесоюзн. симп. по лазерному и акустическому зондир. атмосферы. – Ч. 2. – Томск, 1984. – С. 196 – 199.
43. Ульянов Ю.Н. Точность определения влажности воздуха двухчастотным радиоакустическим зондированием. // Труды X Всесоюзного симп. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. – Ч. 2. – Томск. – 1989. – С. 107 – 111.
44. Чердынцев В.А. Радиотехнические системы. – Минск: Высш. шк., 1988. – 369 с.
45. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. – М.: Сов. радио, 1972. – 463 с.
46. Шифрин Я.С., Новожилов В.И. Построение и эксплуатация антенных систем РАС. – Х.: ВИРТА ПВО, 1976. – Ч. 1. Влияние условий распространения радиоволн на характеристики РАС. – 260 с.
47. Яковлев В.П., Вузман И.П. Сравнение радиолокационного и СВЧ радиометрического методов определения диэлектрической проницаемости // Радиофизика. – 1988. – № 4. – С. 421 – 425.
48. Ямпольский В.Г., Фролов О.П. Антенны и ЭМС. – М.: Радио и связь, 1983. – 272 с.
49. Brown E.H., Cliftord S.F. On the attenuation of sound by turbulence // J. Acoust. Soc. Amer. – 1976. – Vol. 60, № 4. – P. 788 – 794.
50. Cost-76 Profiler Workshop 1997 / Extended Abstracts in 2 vol. – May, 12, 1997. – Engelberg, Swetzerlond. – 388 p.
51. Hall F.F., Wescott J.W. Acoustic antennas for atmospheric echo sounding // J. Acoustic Soc. Amer. – 1974. – № 56. – P. 1376 – 1382.
52. Ottersten H. Radar backscattering from the turbulent clear atmosphere // Radio Sci. – 1969. – № 4. – P. 1251 – 1255.
53. Ravussin P. Remote acoustic-electronic sounding (RACES). The Boulder low-level intercomparative experiment // Org. Rep. – 1980. – № 3. – P. 38 – 47.
54. Ryabokon E.A., Sazonov A.Z., Sukharevsky O.I. Reflector antenna with the hide of the edges by radioabsorbing screens // Proc. International Conf. on Antenna Theory and Techniques V. – Kyiv (Ukraine). – 2005. – P. 191 – 194.
55. Takahashi K., Masuda Y., Matuura N., etc. Analysis of acoustic wave fronts in the atmosphere to profile the temperature and wind with a radio acoustic sounding system // J. Acoust. Soc. Am. – 1988. – Vol. 84, № 3. – P. 1061 – 1066.
56. Ulyanov Y., Maksimova N., Measurements of air humidity with double-frequency RASS. // Proc. 11th ISARS. – Auckland (New Zealand). – 2000. – P. 115 – 118.
57. Ulyanov Yu., Prokopenco Yu., Vetrov V. Potentialities of the Monostatic Inclined RASS for PBL Temperature and Wind Profiling // ISARS'98. – P. 179 – 182
58. Ulyanov Yu., Prokopenko Yu. and Vetrov V. Potentialities of the Monostatic Inclined RASS for PBL Temperature and Wind Profiling // Proc. 9th Int. Symp. on Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans. – Vienna (Austria). – 1998. – P. 179 – 182.
59. American National Standard Methoq for the Calculation of the Absorption of Sound by Atmosphere // ANSI. – 1978. – S. 1 – 26.

Поступила 1.07.2005

Рецензент: доктор технических наук, профессор А.В. Полярус,
Харьковский университет Воздушных Сил.